

# 双馈风力发电机在电网电压小幅骤降时的保护策略

蔡 帜, 刘建政, 梅红明, 王 健, 刘 树

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 提出了一种双馈风力发电机 (DFIG) 在电网电压小幅骤降时抑制变频器电压和电流波动的保护策略。传统的 DFIG 控制方式中通常认为电网电压是理想不变的, 所以当发生电压骤降的情况时, 双馈电机的转子电流、直流电容电压则会因为电网电压的突变而发生电流和电压跳变和波动, 可能会对风电机组的变频器造成损坏。在改进双馈电机转子侧变换器的控制策略的基础上, 通过改进整流侧变换器控制策略和增加卸荷电路, 减小了直流电压的波动和幅值, 提高了系统的暂态稳定性。最后, 通过仿真一台 1.5 MW 双馈风力发电机在电网电压小幅骤降故障状态下的运行情况, 验证了其正确性和有效性。

**关键词:** 风力发电; 双馈电机; 不间断运行; 矢量控制; 卸荷电路

## Protection strategy of DFIG under grid voltage narrow dip

CAI Zhi, LIU Jian-zheng, MEI Hong-ming, WANG Jian, LIU Shu

(State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A protection strategy to limit the converter step current and voltage of doubly-fed induction generator (DFIG) during a grid voltage dip is proposed. Traditional DFIG control schemes consider grid voltage to be ideal unchanged to simplify the design of rotor controller. When the grid falls, the converter may suffer from the rotor step overcurrents and overvoltages in DC-links. In order to enhance the dynamic stability of DFIG, both the rotor excitation control method and DC-link voltage control method are improved in this protection strategy. To realize the protection capability better, off-load circuit to limit the DC-link voltage are used. The correctness and validity of this protection strategy has been verified by simulation results on a 1.5MW DFIG riding through voltage dip.

**Key words:** wind energy generation; doubly-fed induction generator (DFIG); fault ride-through; vector control; off-load circuit

中图分类号: TM315; TM614 文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2009)21-0041-04

## 0 引言

目前大容量风力发电飞速发展, 兆瓦级的双馈风力发电机组 (DFIG) 是当下的研究热点。随着风力发电容量不断增加, 世界上很多国家已经对风电生产提出了新的需求, 即在电网电压降落处于一定范围内时要求风力发电机组必须保持和电网相连, 维持并网运行<sup>[1,2]</sup>。以 2004 年由爱尔兰公布的电网规范为例, 如图 1 所示<sup>[2]</sup>, 当电网电压在实线以上范围内时, 风力发电机必须与电网保持连接。

在电网电压骤降故障下, 公认的实用做法是短接 DFIG 的转子绕组使转子侧变换器旁路<sup>[3,4]</sup>, 此时 DFIG 就如同一台鼠笼式异步发电机, 对电网的恢复没有帮助, 所以只在大幅电压骤降故障下才会考虑使用这种短接保护措施, 而在小幅电压骤降故障时, 应尽量考虑提高 DFIG 的暂态稳定性来实现发电机的不间断运行。

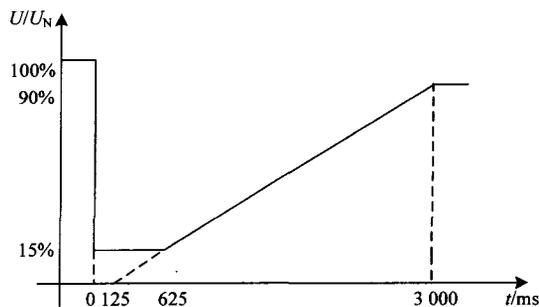


图 1 风力发电机组不间断运行标准

Fig.1 Requirements for fault ride-through capability of wind turbine generator

DFIG 风电机组变频器容量较小, 对电网故障非常敏感, 所以即使是小幅的电网骤降故障, 也会产生跳变过电压过电流损坏变频器中的功率器件, 近几年国内外对此进行了一些相关的研究<sup>[3-8]</sup>, 这些研究主要集中在转子侧过电流的保护, 但较少考虑直流母线电压发生的跳变和波动。直流母线电压的

升高和波动可能会损坏直流母线两侧的功率开关器件和增加系统的不稳定性, 所以应该考虑提高电压骤降故障下的直流母线电压的稳定性能。本文提出的保护方案在采用改进励磁控制策略的同时, 也改进了直流电压控制策略和增加卸荷电路, 更好地提高了系统的暂态稳定性。

### 1 DFIG 在电压骤降下的运行特性

很多国家已经对 DFIG 在电压骤降故障下的运行特性进行了研究, 国内外也有不少文献进行了报道<sup>[9,10]</sup>。

电网电压骤降故障过程可以分为两个阶段, 一是电压骤降期间, DFIG 从正常运行过渡到故障运行, 二是电压恢复后, DFIG 从故障状况恢复到正常运行。

在电压骤降期间, 定子电压突然骤降, 使得定子磁链发生变化, 这导致转子电流随之急剧增加以试图维持磁链不变。电磁转矩随之上升, 导致发电机转速下降, 从而引起转速和有功、无功的波动。转子电流和电网电压的突变会导致直流侧电容电压的跳变和波动。

在电压恢复期间, 与上述过程相似, 定子磁链变化, 转子电流跳变以维持磁链不变, 电磁转矩的下降引起转速上升。直流侧电容电压会发生跳变和波动, 之后在控制系统的作用下, 风电机组恢复到电网发生故障前的正常运行状态。

所以, 电网故障导致机端低电压时, 出现的过电流、过电压可能会对变流器造成损坏, 针对电压小幅骤降故障保护策略的主要目标应是对转子过电流和直流电容电压波动的抑制。

### 2 电压小幅骤降的 DFIG 保护措施

本文设计的 DFIG 保护措施包括两个部分: 一是改进对转子侧变换器控制策略; 二是减小直流电容电压的幅值和波动。

#### 2.1 改进转子侧变换器控制策略

同步旋转坐标系下 DFIG 的电压和磁链方程为:

$$\begin{cases} V_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_1 \Psi_s \\ V_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j\omega_s \Psi_r \\ \Psi_r = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_s = L_m I_s + L_r I_r \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $V$ 、 $I$ 、 $\Psi$  分别代表电压、电流和磁链矢量,  $R$ 、 $L$  分别代表电阻、电感, 下标 s、r 分别代

表定子、转子,  $L_m$  为定、转子间的互感,  $\omega_1$  为同步电角速度,  $\omega_s$  为滑差角速度。

常规的双馈电机功率控制策略是将定子磁链定向, 即把电压和磁链假定为恒定值, 这个控制策略在电网电压稳定的情况下可获得良好的动静态响应, 但不适用于电压骤降故障过程的运行控制。因为定子电压和磁链在故障状态下不是常量, 所以需要重新考虑定子电压和磁链的作用, 否则故障发生和恢复时, 电机端电压发生跃变, 测量定子磁链用的积分器发生积分饱和, 导致定子磁链不能准确定向, 将会造成有功、无功控制不能解耦, 整个控制系统在故障过程中无法实现预想的控制效果。加入定子电压和磁链的补偿项<sup>[5]</sup>, 可以表示为:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_s \Psi_{rq} + \frac{L_m (V_{sd} - R_s I_{sd})}{L_s} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \sigma L_r \frac{dI_{rq}}{dt} - \omega_s \Psi_{rd} + \frac{L_m (V_{sq} - R_s I_{sq} - \omega_1 \Psi_{sd})}{L_s} \end{cases} \quad (2)$$

从而可以得到适合于电压骤降运行的转子励磁控制框图如图 2 所示。

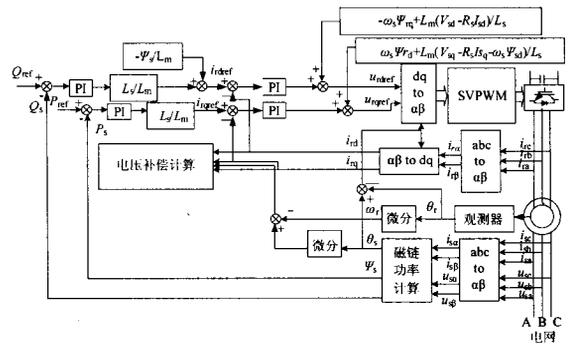


图 2 DFIG 转子侧变流器改进控制策略框图

Fig.2 Diagram of the modified rotor converter control method

对于电流控制器在低电压状态下参考值的设定, 如果为了保持输出功率不变, 那么转子电流控制器指令电流将与实际电流不等, 会导致积分器的饱和, 从而产生大的暂态振荡过渡。为了避免大的振荡, 应采用软暂态过渡到正常运行, 即在电压骤降故障期间, 将转子电流控制指令设定为该时刻转子电流的实际值, 在转子电流控制器的作用下发电机将逐步恢复到平衡运行状态。

### 2.2 改进整流侧变换器控制策略

改进转子侧变换器控制方案会增加直流母线电压的不稳定<sup>[5]</sup>, 为了减小直流电压的波动, 可采用在直流母线侧加装大容量电容的方法, 该方法可以减少母线电压的波动, 但是存在成本和寿命降低的缺点。本文采用功率前馈的控制方法, 将逆变侧电机电流的变化直接反映在整流侧电流内环的参考值上, 即在原直流电压控制策略上增加负载转子电流变化量  $\hat{i}_{load}$  的前馈控制, 如图 3 所示。这样使电机转子电流的突变更快地反应到整流侧电流内环的电流参考值上, 而减弱了对直流电容电压的影响, 减小直流电压的波动。

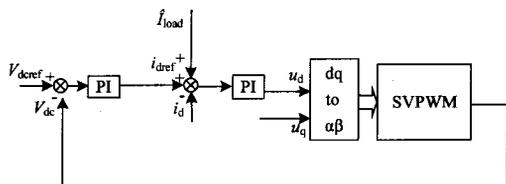


图 3 DFIG 直流母线电压改进控制策略框图

Fig.3 Diagram of the modified DC-link voltage control method

基于对能量守恒关系的分析, 在低电压状态下, 发电机机端电压比正常工况低, 系统无法正常向电网输送电能。而风力机惯性较大, 调桨系统调节的范围有限, 所以获得的风能将会过剩, 为了更好的抑制直流电容电压的波动和幅值, 增加卸荷电路卸掉部分过剩的风能会更好地提高电容电压的稳定性。

在直流侧增加卸荷电路, 由卸荷电阻与功率器件连接构成, 如图 4 所示。在电网电压骤降到 0.85 pu 以下时, 投入卸荷电路, 可以消耗掉部分聚集于直流电容上的能量而减少电容电压的跃变。卸荷电阻只为消耗部分积累的能量而不应引起系统的不稳定, 所以选值不宜过小, 本文的系统中取该电阻值为 8 Ω。

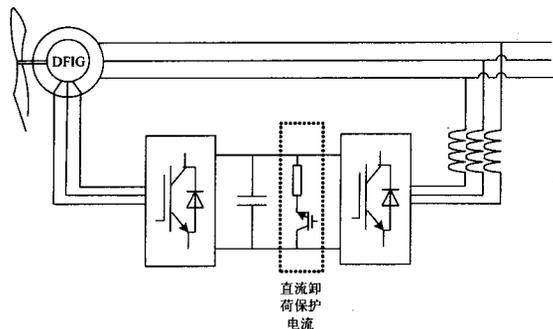


图 4 DFIG 电压小幅骤降运行的卸荷电路结构图

Fig.4 Off-load circuit topology of DFIG under voltage narrow dip

### 3 仿真实证

为了验证所提出的 DFIG 的电压骤降保护策略, 在仿真软件 PSCAD/EMTDC 环境下搭建了典型的 1.5 MW 的 DFIG 风力发电系统的仿真模型, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 DFIG 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of DFIG	
参数	数值
额定功率	1.5 MW
额定电压	690 V
额定直流电压	1 100 V
直流电容	10 000 μF
定子电阻	0.01 pu
转子电阻	0.009 pu
定子漏感	0.173 pu
转子漏感	0.152 pu
定、转子互感	2.9 pu
定、转子匝数比	0.38
惯性时间常数	5 s
直流卸荷电路电阻	8 Ω

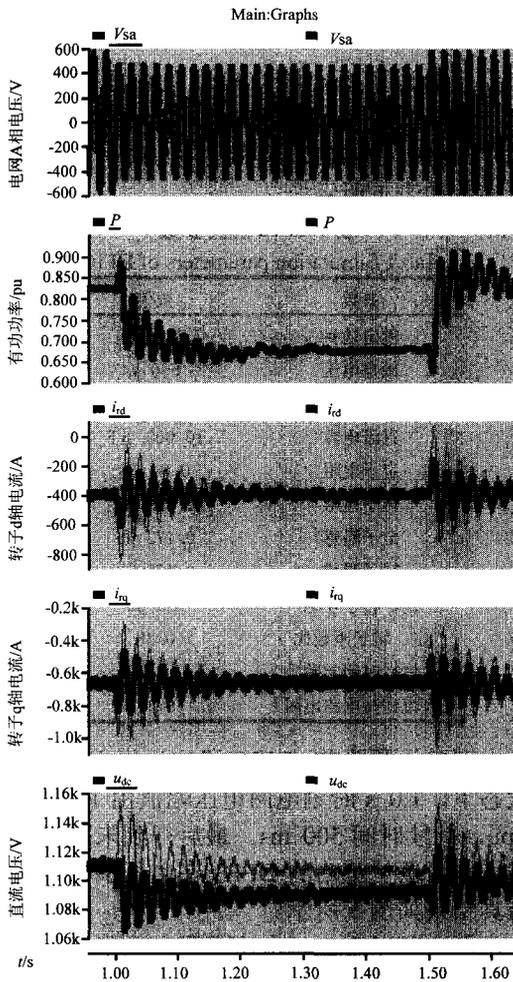
电网电压骤降前, DFIG 稳定运行于转速 1.2 pu 的状态下, 1.0 s 时刻电网电压幅值由 1 pu 骤降至 0.8 pu, 持续时间 500 ms。最后得到未采用保护策略和采用了保护策略的 DFIG 在电压小幅骤降运行的仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 电压骤降和恢复处, 转子电流和直流电容电压产生冲击电流和电压。输出有功功率在电网骤降后从 0.82 pu 减小到 0.67 pu, 过剩能量聚集于直流电容上产生过电压。采用保护策略以后, 转子电流冲击的幅值得到了很大的削弱, 同时通过整流侧变换其控制策略的改进和卸荷电路的作用, 直流电容电压的幅值和波动都被大幅削弱, 表明了该保护策略能够有效地提高 DFIG 在电压小幅骤降故障中的暂态稳定性。

### 4 结论

假定电网电压恒定的传统 DFIG 控制模型不适用于电压骤降故障状态下的运行, 对此本文研究和提出了一种实现 DFIG 在电压小幅骤降情况下安全运行的保护策略。

首先从理论上分析了传统的工作于理想电网下的 DFIG 控制策略在电压骤降故障运行时会产生转子过电流和直流过电压而可能损坏变流器, 由此改进了转子侧和直流侧变换器的控制策略以适应 DFIG 的低电压运行。另外为了更好地限制直流电容电压, 辅助增加了卸荷电路。最后通过 PSCAD



(细线表示未采用保护策略；粗线表示采用了保护策略)

图5 未采用保护策略和采用了保护策略的DFIG在电压骤降故障时的动态响应仿真

Fig.5 Simulation of DFIG dynamic responses with protection strategy and without during voltage dip

仿真软件对未采用保护策略和采用了保护策略的DFIG并网系统进行仿真比较,结果表明:采用此保护策略以后,DFIG在电压小幅骤降故障的情况下转子的跳变电流和直流母线电压的跳变电压明显削弱,暂态性能得到了提高,为实际系统的设计提供了一定的理论基础。

参考文献

[1] Erlich i, Bachmann U. Grid Code Requirements Concerning Connection and Operation of Wind Turbines in Germany [A]. in:Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting [C]. 2005.1253-1257.  
 [2] Ireland National Grid. Wind Farm Power Station Grid Code Provisions (2004) [EB/OL]. <http://eirgrid.com/EirGridPortal/uploads/Regulation and Pricing/WFPS1.pdf>

[3] 张兴,张龙云,杨淑英,等. 风力发电低电压穿越技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(2): 1-7. ZHANG Xing, ZHANG Long-yun, YANG Shu-ying, et al. Low Voltage Ride-through Technologies in Wind Turbine Generation [J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and its Automation, 2008,20(2): 1-7.  
 [4] 李建林,赵栋利,李亚西,等. 适合于变速恒频双馈感应发电机的Crowbar对比分析[J]. 可再生能源,2006(5): 57-60. LI Jian-lin, ZHAO Dong-li, LI Ya-xi, et al. Analysis of Crowbar Circuit for Variable Speed Constant Frequency Doubly Fed Induction Generator [J]. Renewable Energy, 2006, (5): 57-60.  
 [5] 胡家兵,孙丹,贺益康,等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化,2006,30(8): 21-26. HU Jia-bing, SUN Dan, HE Yi-kang, et al. Modeling and Control of DFIG Wind Generation System Under Grid Voltage DIP [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 21-26.  
 [6] Rathi M R, Mohan N. A Novel Robust Low Voltage and Fault Ride Through for Wind Turbine Application Operating in Weak Grids[A]. in: Proceedings of IEEE 2005 31st Annual Conference of the Industrial Electronics Society [C]. 2005.2481-2486.  
 [7] Xiang D, Ran P, Tavner L J, et al. Control of a Doubly-fed Induction Generator in a Wind Turbine During Grid Fault Ride-Through [J]. IEEE, 2006: 652 – 662.  
 [8] Johan M, Sjoerd W H de H. Ride Through of Wind Turbines with Doubly-fed Induction Generator During a Voltage Dip [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.  
 [9] XIE Bing, Fox B, Flynn D. Study of Fault Ride-through for DFIG Based Wind Turbines [A]. in: Proceedings of IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies[C]. 2004.411-416.  
 [10] 李梅,李建林,赵斌,等. 不同电网故障情况下DFIG运行特性比较[J]. 高电压技术,2008,(4): 777-782. LI Mei, LI Jian-lin, ZHAO Bin, et al. Comparison of Response of Wind Turbine with DFIG During Different Grid Voltage Dips [J]. High Voltage Engineering, 2008, (4): 777-782.

收稿日期:2008-11-10

作者简介:

蔡帜(1985-),男,硕士研究生,研究方向为风力发电技术;E-mail: caiz02@mails.tsinghua.edu.cn

刘建政(1961-),男,副教授,研究领域为电力系统控制及新能源发电;

梅红明(1984-),男,硕士研究生,研究领域为新能源发电、电力电子。